正弦锯齿尾缘对轴流风机尾迹及气动性能的影响

唐 俊1 王 军[1] 隽智辉[1] 刘 辉[1] 吴兰勇[2]

（1. 华中科技大学能源与动力工程学院，湖北 武汉 430074；

2. 广东绿岛风室内空气系统科技有限公司，广东 台山 529200）

摘要:轴流风机尾缘涡脱落是产生噪声的重要因素，为改善尾迹流动来降低风机噪声，通过在轴流风机尾缘添加一种正弦形锯齿结构，采用定常及非定常数值模拟的手段结合实验验证的方式，分析其对轴流风机尾迹和气动性能的影响。研究结果显示，正弦锯齿结构削弱了叶片尾缘做功能力，使得风机全压降低，但提升了中小流量工况下风机效率；并能减弱叶片中部以下位置的尾迹强度，且对尾迹的抑制作用从叶片部底到中部逐渐减弱；以增加转速的方式补偿锯齿结构引起的压损，对原型风机和提升转速后的尾缘锯齿结构风机在设计流量点进行噪声数值预测分析，结果显示低频段噪声比原型机有明显改善，表明这种尾缘正弦形锯齿结构一定程度上是一种抑制轴流风机低频噪声的有效途径。

关键词:正弦锯齿尾缘；轴流风机；尾迹；噪声

中图分类号：TH432.1 **文献标识码**：A

The Influence of Sinusoidal Serrated Trailing Edge on the Wake and Aerodynamic Performance of Axial Fan

Tang Jun[1] Wang Jun[1] Juan Zhi-hui[1] Liu Hui[1] Wu Lan-yong[2]

（1. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China；

2. Guangdong Nedfon Indoor Air system Technology Co.,itd, Taishan 529200, China）

Abstract：Vortex shedding at the location of trailing edge of the axial fan is an important factor to generate noise. Aiming at ameliorating the wake flow to decrease noise, a sinusoidal sawtooth structure was added to the trailing edge of the axial fan. The effects of the wake and the aerodynamic performance of the axial fan are studied by means of steady and unsteady numerical simulation combined with the experimental verification. The results indicate that the sinusoidal sawtooth structure weakens the power ability of the trailing edge of the blades, which reduces the total pressure of the fan, but enhances the efficiency of the fan under the small and medium flow rate conditions. Meanwhile, it can weaken the wake strength at the lower part of the blade, and the restraining effect on the wake was gradually weakened from the bottom to the middle of the blade. For the purpose of compensation for power capability losses due to serrated trailing edge, numerical predictions about noise on prototype and modified model which operate under higher rotor speed have been both calculated. It is argued that the sinusoidal serrated trailing edge structure has positive effects on reducing low frequency noise. Thus, it can be inferred that this kind of trailing edge with sinusoidal sawtooth structure is an effective way to restrain the low frequency noise of axial fan to a certain extent.

Key words：sinusoidal serrated trailing edge; axial fan; wake; noise

0 引 言

轴流风机应用广泛，降噪是其主要研究方向之一。风机叶片尾缘涡流脱落是重要的噪声源，即改善尾缘处流动将有助于降低风机噪声，而尾迹控制是实现降噪的有效手段，包括尾缘穿孔、尾缘开缝、尾缘吹气、尾缘锯齿[1]等方法都可以实现对尾迹的控制，考虑到低压轴流风机中叶片结构限制，尾缘锯齿是一种简单宜行的尾迹控制手段。

Howe[2,3]从理论上研究了正弦形锯齿尾缘和三角形锯齿尾缘的降噪潜力，指出合理的尾缘锯齿结构在特定频率范围内可极大降低尾缘噪声，为锯齿结构的应用奠定了理论基础。游斌[4]在空调外机轴流风机叶轮中应用尾缘锯齿结构，指出锯齿结构能削弱下游尾迹，使得噪声降低。宫武旗[5]通过实验研究指出在空调外机轴流风机中，锯齿结构尺寸同尾迹

宽度相近时具有最佳的降噪效果。刘小民[6]在多翼离心风机中应用仿生设计尾缘锯齿结构，也使风机噪声得到改善。

针对锯齿结构对风机噪声的影响，之前的研究更多局限在小型风机及空调外机轴流风机中，但在工业用通风机中锯齿结构并不常见，本文通过在轴流通风机叶轮尾缘处添加正弦形锯齿结构，研究其对轴流风机尾迹及气动特性的影响。

1　原型风机模型及锯齿结构参数

选用的轴流风机无前后导叶、叶片为直叶片，叶轮结构如图1，其结构参数为：叶轮外径 D=900 mm、叶片数 Z=9、轮毂比 d_h=0.226、根部安装角β_A=35°；设计流量点处流量 Q=8.4 m³/s、全压 P_{tf}=340 Pa，转速 n=1460 r/min。

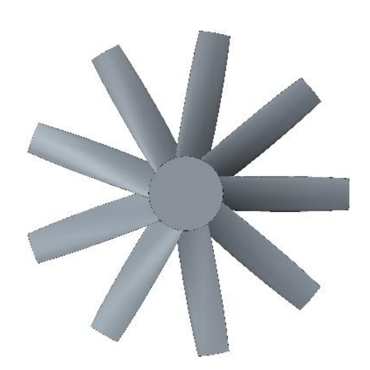


图 1　原型风机叶轮模型

Fig. 1　The impeller model of prototype fan

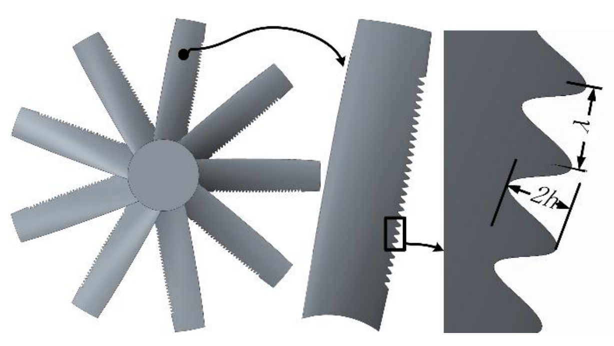


图 2　锯齿结构叶轮模型及锯齿结构尺寸示意

Fig. 2　The impeller model with serrated trailing edge structure and the schematic diagram of the saw-tooth structure

通过在原型风机叶轮尾部去除材料得到所研究的锯齿结构，采用的锯齿结构形状为正弦形，齿尖落在原型风机叶片尾缘上，齿宽 λ=9.2 mm、齿高 h=4.6 mm，即锯齿宽高比 λ/h=2，沿尾缘均匀分布26个锯齿，第一个锯齿起始位置位于叶片展向13.5%处，最后一个锯齿终止于叶片展向84.1%处。

为便于行文描述，定义原型风机为模型 A，添加锯齿结构后的风机为模型 B。

2　数值模拟方法及实验验证

2.1　数值方法

计算时进口设置为压力进口、出口为压力出口，稳态求解时均N-S方程采用Realizable k-ε 湍流模型，速度和压力耦合选择 SIMPLE 算法，离散格式采用二阶精度格式，残差值小于 1×10^{-5} 且监测值稳定时认为计算收敛。

2.2　网格及无关性验证

计算域分为进口域、叶轮域和出口域，其中进、出口域采用结构六面体网格，叶轮域采用非结构四面体网格，相较叶轮而言，锯齿尺寸较小，对锯齿所在叶片尾缘区域进行局部加密。图3中分别给出B整体计算模型、叶轮域和叶片尾缘锯齿处网格划分。

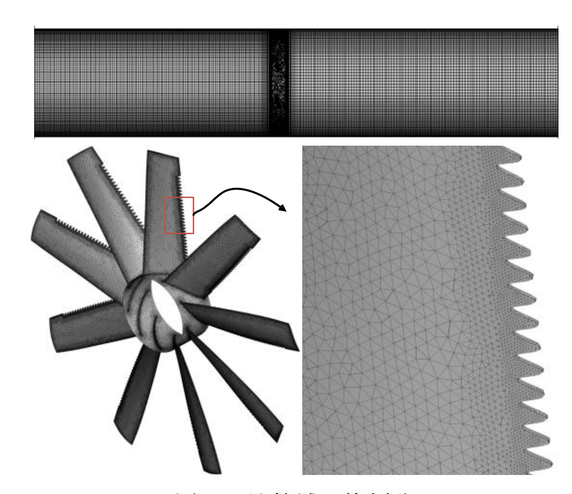


图 3　计算域网格划分

Fig. 3　The mesh of calculation domains

数值计算结果受网格疏密程度不同的影响，为保证计算结果不受网格疏密程度影响，对 A 计算模型进行了网格无关性检验，如图4，当整个计算域网格数目超过 8×10^6 时，风机转矩和效率基本不随网格数目增加而改变。

A 计算模型，进口域网格数 1089616、叶轮域网格数 9057815、出口域网格数 868521，网格数总计11015952。添加尾缘锯齿结构后，叶片尾缘略有不同，保证相同区域网格尺寸相同，两者叶轮域网格数目有所不同，但两者网格总数都超过 8×10^6，其计算基本不受网格数目变化影响。

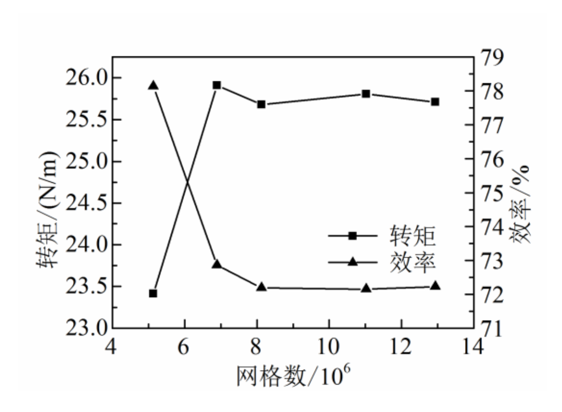


图 4 网格无关性检验

Fig. 4 Grids-independence test

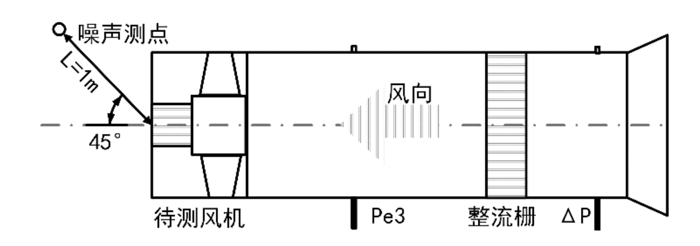


图 5 风机测试装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of fan test device

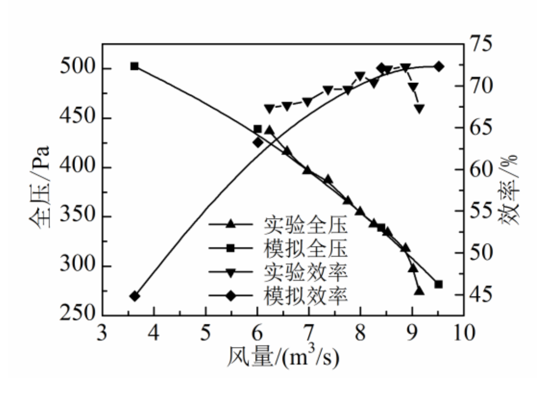


图 6 A 模拟与实验性能曲线对比

Fig.6 Performance curves contrast by simulation and test of model A

2.3 气动特性模拟及实验对比

为检验数值模拟准确性，对模型 A 进行气动性能测试，所用实验装置满足《GB/T1236-2000》标准规定，测试装置为图 5 所示的 C 型测试装置。

图 6 中为 A 的模拟与实验性能曲线对比，全压和效率随流量变化趋势基本一致的。同等流量下，全压最大误差 4.58%，效率最大误差 3.97%，认为模拟方法是可信的。

3 结果分析

3.1 做功能力影响

图 7 为 A、B 两模型在同转速下气动性能对比，添加尾缘锯齿后，全流量范围内，风机全压下降，但在中小流量范围内，效率提升 1~2%。其中在设计流量点处，全压下降 11.5%，效率保持不变。

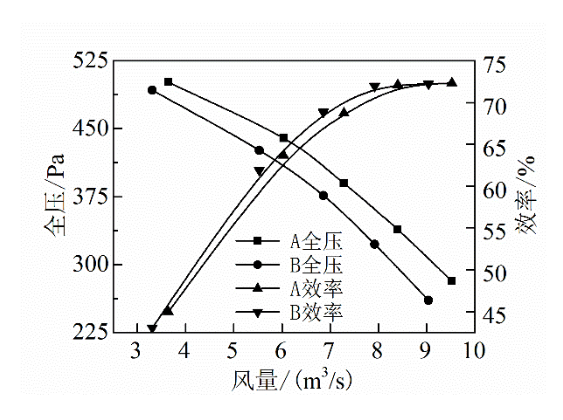


图 7 A 和 B 气动性能曲线对比

Fig.7 Performance curves contrast by model A&B

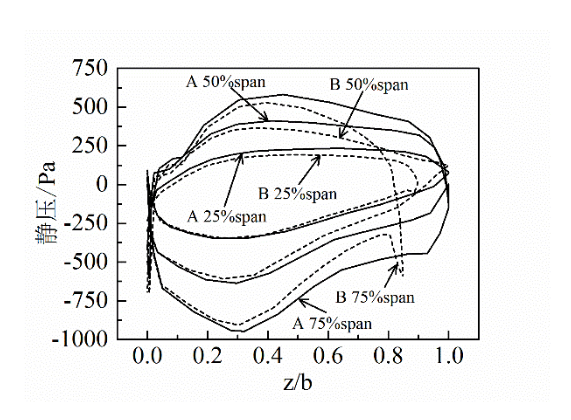


图 8 A 和 B 叶片表面静压分布

Fig. 8 The static pressure distribution in the blade surface of model A&B

为进一步研究尾缘锯齿结构对风机做功能力影响，对 A、B 在设计流量点 Q=8.4 m³/s 时内流进行对比分析。

图 8 为叶片展向 25%、50%和 75%三个位置的叶片表面静压分布。三个展向位置处，两者静压分布在前缘位置附近基本保持一致；在叶片中段到尾缘位置，压力面上模型 B 的静压更低，而吸力面上则是模型 A 的静压较低。说明尾缘锯齿结构不影响风机前缘做功能力，其主要作用在叶片靠近尾缘的中后段，其使得叶片尾缘部分压力面压力降低，吸力面压力升高，削弱尾缘部分做功能力，从而使得

风机全压下降。

3.2 尾缘区速度分布

在模型 A 的叶轮展向 25%、50%、75%上叶片尾缘轴向 3 mm 处取三个圆环线，在这三个圆环上提取轴向速度，相应在模型 B 上同样位置提取轴向速度。

图 9 中给出了 A 和 B 在这三个圆环位置上 0~80°范围内轴向速度的分布情况，图中向下凹陷的低速区域对应的位置正好是叶片尾缘位置，叶轮有 9 个叶片正好对应 9 个这样的低速位置，则存在 9 个局部极小值，表 1 中给出了此 9 个轴向速度的局部极小值的平均值C_{zmin}，可记为：$C_{zmin}=min\{C_z\}$。在相同展向位置处，除 75%叶展位置，模型 B 在该处的C_{zmin}更大，与主流速度更接近，且从 25%到 50%叶展位置上，A 与 B 的C_{zmin}差值逐步减小，在 75%位置，两者的C_{zmin}差值由负转正。此表明，锯齿结构对不同叶片展向位置上尾迹的影响程度不同，且从叶片底部到中部，对尾迹的抑制程度逐渐减轻，而在叶片中上段，锯齿结构对尾迹减弱的作用不明显甚至起相反的作用。

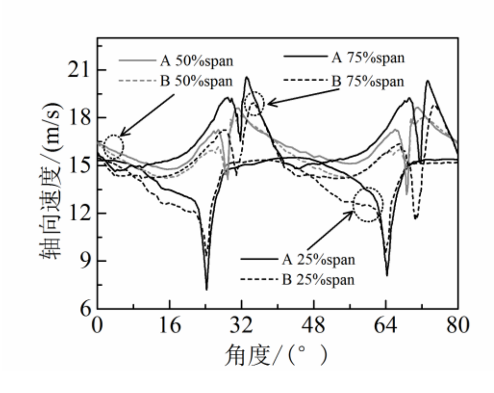


图 9 A 和 B 轴向速度周向分布

Fig. 9 The distribution of axial velocity in circumferential direction of model A&B

表 1 尾缘后 3mm 处轴向速度周向极小值

Table 1 C_{zmin} behind the location of trailing edge

展向位置	25%	50%	75%
模型 A/(m/s)	7.655	13.761	14.559
模型 B/(m/s)	9.607	14.239	13.635
差值/(m/s)	-1.952	-0.478	0.924

周向上轴向速度的极小值即尾迹区的中心速度，由此定义尾迹中心速度系数φ_c：

$$\varphi_c=C_{zmin}/\overline{C_z}$$

$$\overline{C_z}=\oint C_z\,dl\,/\oint dl$$

$\overline{C_z}$为轴向速度周向平均值，由定义知φ_c值越小，尾迹中心速度与主流速度相差越大，尾迹越强，反之，尾迹中心速度与主流速度相差越小，尾迹越弱，轴向上φ_c的变化即可反映出尾迹的变化情况。

图 10 给出φ_c在叶片展向 25%、50%和 75%三个圆周面上沿流向变化情况，其中横轴代表流向，0 表征叶轮进口位置，1 表征叶轮出口位置。φ_c沿流向迅速提升至最大值，而后缓慢下降，在φ_c达到最大值之前，在相同轴向位置处，有尾缘锯齿时，φ_c更大，即其与主流速度更接近，尾迹更弱；且在 50%周向圆柱面上，φ_c以更短的周向距离上达到其最大值。可见锯齿在削减尾迹强度的同时可能使叶片局部的尾迹衰减更快。

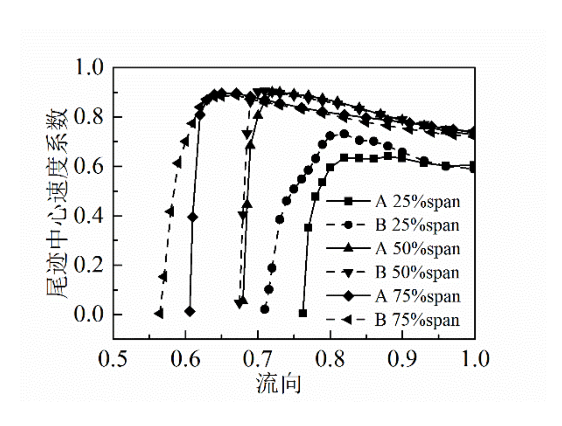


图 10 A 和 B 尾迹中心速度系数流向分布

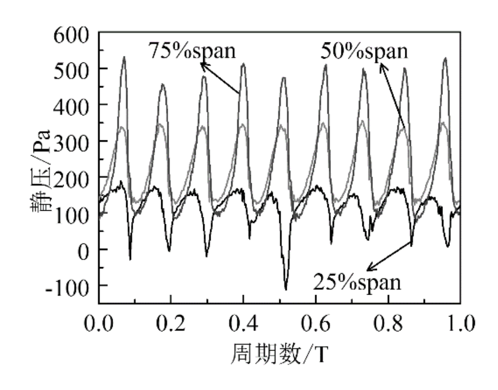
Fig. 10 The distribution of φ_c in the flow direction of model A&B

3.3 尾缘区压力脉动

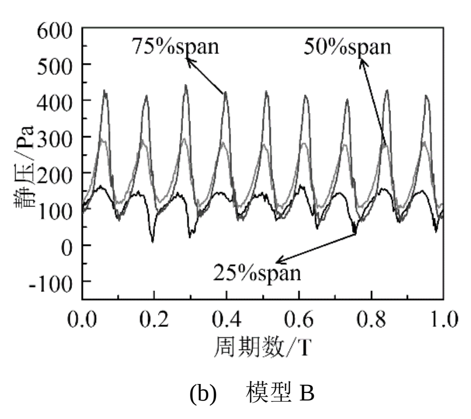
在稳态计算的基础上进一步进行 LES 非定常计算，计算时叶轮域采用滑移网格模型，压力离散格式为 PRESTO!，动量采用有界中心差分格式，时间项为有界二阶隐式形式，取时间步长Δt为叶轮旋转 1°所用时间。

在叶片展向 25%、50%和 75%三个周向圆环面上设置三个监测点，且这三个监测点同叶片尾缘与三个圆环面的交点轴向距离 3 mm。

图 11 为三个监测点处同一周期内压力脉动时域变化，横轴为周期数，纵轴为静压。无论是 A 还是 B，监测点静压都随时间有规律的变化，出现 9 个波峰和波谷，与叶片数恰好对应。且叶片展向高度越大，压力波动越剧烈；但在相同展向位置，B 的压力变化幅度皆小于 A。



(a) 模型 A



(b) 模型 B

图 11 监测点压力脉动时域图

Fig. 11 Time-domain curves of pressure pulsation at the monitor points

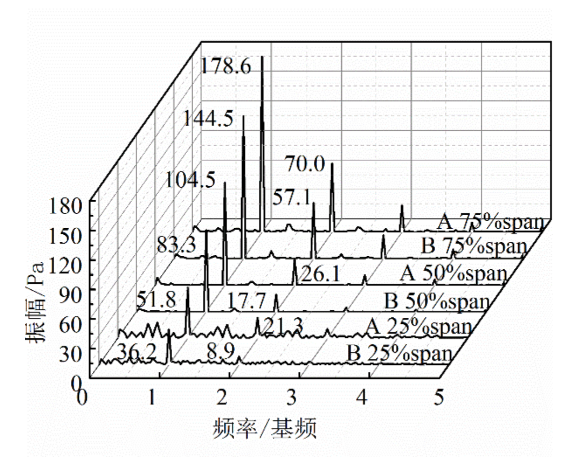


图 12 A 和 B 监测点压力脉动频谱图

Fig. 12 the spectrum of pressure pulsation at the monitor points of model A&B

当频率超过 1000 Hz 时，压力脉动幅值几为零，故图 12 中给出了 5 倍基频(叶片数为 9、转速为 1460 r/min 时，旋转基频为 219 Hz）范围内的压力脉动。由图 12，在基频和二倍频处，压力脉动幅值远大于其余频率处幅值。对比相同监测位置，锯齿风机在基频和二倍频处压力幅值有较大程度降低，尤其在 25%叶展位置，基频降幅达 30.0%，二倍频降幅达 58.2%，由此知尾缘锯齿结构引起的压力脉动降低主要是由于基频和二倍频在内的低频压力造成的。

声学波动方程[7,8]中的偶极子噪声源表达式为：

$$r(y,\tau)=-\frac{\partial F_i}{\partial x_i}=\frac{x_i-y_i}{rc_0}\frac{\Delta s_i\partial p}{\partial t}$$

分析知气动噪声对远场噪声主要由$(x_i-y_i)/(rc_0)$、Δs_i、$\partial p/\partial t$三项决定，其中$\partial p/\partial t$代表压力脉动项随时间变化，且在量级上远大于其余两项，为决定声源强度的最主要因素，则尾缘处压力脉动的减弱将使尾缘处声源强度降低。

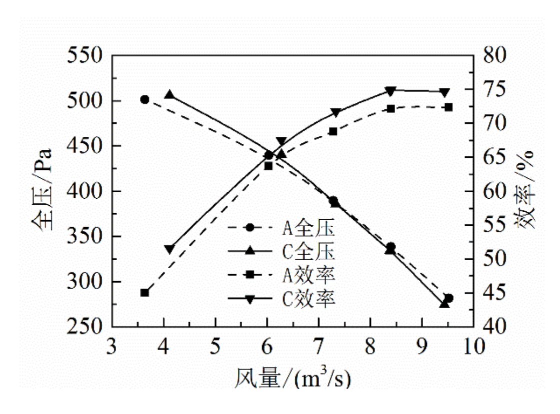


图 13 A 和 C 特性曲线对比

Fig.13 Performance curves contrast by model A&C

3.4 气动噪声预测及分析

锯齿结构使得风机做功能力下降，损失部分气动性能，可通过提升转速得到补偿损失的做功能力，由此在原转速基础上提升转速到 1510 r/min。提升转速后的尾缘锯齿风机定义为 C。如图 13，C 的压力曲线和 A 基本保持一致，且全流量范围内风机效率提升 2%左右。

噪声分析在模型 A 和 C 上进行，选取设计流量点进行对比。

噪声预测采用两步法，首先进行 LES 非定常计算获取声源处信息，当所监测的叶轮转矩稳定的周期性变化时，认为非定常计算达到稳定状态，再应用 FW-H 方程对声源信息积分得到监测点的声学信号，对声学信号进行 FFT 变换获取噪声频域信息。

风机噪声测试在如图 5 中标示的噪声测点进行，表 2 中给出了 A 和 C 在该点处的预测值和实测值，其中 A 预测值和实测值相差 3.3 dB，误差为 3.6%，考虑到现场环境复杂以及模拟简化等因素，认为数值模拟的结果是可信的。在该噪声测试点，模型 C

的声压级仍比模型 A 低 0.9 dB，表明锯齿结构确能有效的降低风机噪声。

图 14 为测点 A 计权的 1/3 倍频声压频谱分布，在小于 256 Hz 的低频段，C 的声压级有较大降幅，在中高频段，声压级下降幅度不显著，而在 512 Hz 和 3000 Hz 两个频率附近各有一个频段的声压级略微提升，表明正弦尾缘锯齿结构起到抑制低频噪声的作用，也同图 12 中锯齿结构削减低频压力脉动强度的现象相契合。

表 2 噪声预测值和实测值

Table 2 Predictive and measuring value of the noise

风机	模型 A	模型 C
预测声压级/dB(A)	94.9	94.0
实测声压级/dB(A)	91.6	——
差值/dB(A)	3.3	——

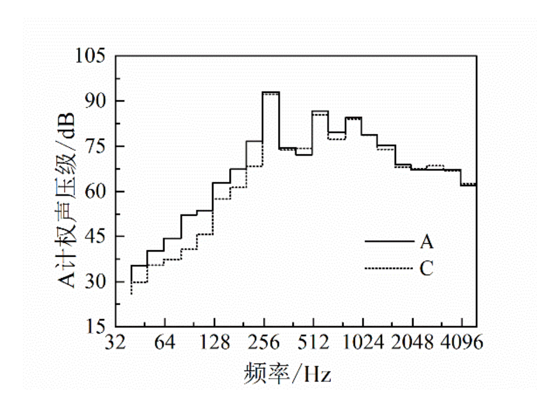


图 14 A 和 C 1/3 倍频 A 计权声压级

Fig. 14 1/3 octave A-weighted SPL of model A&C

4 结论

对正弦形尾缘锯齿轴流风机展开定常和非定常数值模拟，结合实验验证，研究其对轴流风机尾迹和气动特性的影响，得到结论：

1) 正弦形尾缘锯齿结构削减了叶片尾缘做功能力，使得风机全压下降，效率提升。

2) 正弦形尾缘锯齿结构减弱叶片根部到中部位置的尾迹强度，且起抑制尾迹作用从底部到中部逐渐减弱。同时尾缘锯齿结构有助减弱尾迹区压力脉动，主要作用范围是基频和二倍频在内的低频压力。

3) 补偿由锯齿结构引起的压力损失后，风机效率提升的同时仍取得一定的降噪效果，且其主要抑制低频噪声。

参 考 文 献

[1] Longhouse R E. Vortex Shedding Noise of Low Tip Speed, Axial Flow Fans [J]. Journal of Sound and Vibration, 1977, 53(1):25-46.

[2] Howe M.S., Aerodynamic Noise of a Serrated Trailing Edge. Journal of Fluids and Structures [J], 1991, 5(1): 33-45

[3] Howe M.S., Noise Produced by a Saw-tooth Trailing Edge. Journal of the Acoustical Society of America [J], 1991, 90(1): 482-487

[4] 游斌，程志明，马列，等. 齿形尾缘轴流叶轮内流数值分析与实验研究 [J]. 工程热物理学报，2007, 28(4):592-594

You Bing, Cheng Zhiming, Ma Lie, et al. Numerical analysis and Experimental Research on the Internal Flow Characteristics of Axial Flow Fan With Tooth Shaped Trailing Edge [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(4):592-594

[5] 宫武旗，王芳，田镇龙,等. 叶片锯齿尾缘对降低空调室外机气动噪声影响的试验研究[J]. 工程热物理学报，2011, 32(10):1681-1684

Gong Wuqi, Tian Fang, Tian Zhenglong, et al. Experimental Study of the Effect of Serrated Blade Trailing Edge on Axial Fan Noise Reduction in an Outdoor Air Conditioner [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(10):1681-1684

[6] 刘小民，赵嘉，李典. 单圆弧等厚叶片前后缘多元耦合仿生设计及降噪机理研究[J]. 西安交通大学学报，2015, 49(3):1-10

LIU Xiaomin, ZHAO Jia, LI Dian. Noise Reduction Mechanism of Single-Arc Bionic Blade with Wave Shape Leading Edge Coupled with Serrated Trailing Edge [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(3):1-10

[7] Polacsek C, Desbois Lavergne F. Fan Interaction Noise Reduction Using a Wake Generator: Experiments and Computational Aeroacoustics [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 265(4): 725-743

[8] 周水清，低速风机内部非定常流动分离控制及应用研究 [D]，武汉：华中科技大学, 2015

Zhou Shuiqing. Separation Control and Applied Research in Unsteady Flow of Low-speed Fan [D], Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015

联系方式：

唐　俊

流体机械及工程 硕士

华中科技大学 能源与动力工程学院

手机：13071226615

Q Q：1194730520

邮箱：tangjun_hust@foxmail.com

地址：湖北省 武汉市洪山区珞瑜路 1037 号华中科技大学 动力楼 510 室

邮编：430074